Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

Smart materials between application difficulties and Executability

المواد الذكية بين صعوبات التطبيق وقابلية التنفيذ

د/ زكريا أحمد عبد الفتاح عمار

معهد أكتوبر العالي للهندسة والتكنولوجيا، مصر.

ملخص البحث:

المواد الذكية تمثل تقنية حديثة في مجال العمارة وشهدت العقود الماضية اهتمامًا متزايدًا باكتساب المعرفة بالمواد الذكية وتطبيقاتها. وهي فئة من المواد التي يمكن أن تغير خصائصها الفيزيائية، مثل الشكل، أو الحجم، أو الصلابة أو اللون والموصلية الكهربائية، استجابة للمؤثرات الخارجية، مثل درجة الحرارة والضغط، الضوء أو الرطوبة أو المجالات المغناطيسية أو الكهربائية. وتعتبر تحولًا هامًا في صناعة البناء وتوفر إمكانيات إضافية للتحكم في المباني وتعزيز الكفاءة والاستدامة. إلا أن هناك العديد من العوائق أمام تطبيق المواد الذكية فى العمارة مثل ارتفاع تكلفة تنفيذ المشاريع، والتكنولوجيا العالية التي لا يمكن تنفيذها في الدول النامية مما يزيد من تعقيد عمليات التنفيذ بالإضافة إلى مهارات الخاصة التي تحتاجها في التثبيت والصيانة. مما يجعل عدد من تلك المواد يظل في طور التجربة ونتائجها غير موثوق بها. يهدف البحث إلى استكشاف معايير يمكن من خلالها تحديد مدى قابلية المواد الذكية للتطبيق في مجال الهندسة المعمارية وذلك من خلال طرح مجموعة من المواد الذكية وعرض سلوكها وخصائصها وعوائق اندماجها داخل النظام الذكي في المبنى.

الكلمات المفتاحية: المواد الذكية، العمارة، خصائص المواد، أنظمة المواد الذكية، النانو تكنولوجي.

Abstract:

Smart materials represent a new technology in the field of architecture and the past decades have witnessed a growing interest in gaining knowledge of smart materials and their applications. It is a class of materials that can change their physical properties, such as shape, size, hardness, color, and electrical conductivity, in response to external stimuli, such as temperature, pressure, light, humidity, or magnetic or electric fields. It is considered an important transformation in the construction industry and provides additional capabilities to control buildings and enhance efficiency and sustainability. However, there are many obstacles to the application of smart materials in architecture, such as the high cost of implementing projects, and high technology that cannot be implemented in developing countries, which increases the complexity of implementation processes, in addition to the special skills needed in installation and maintenance. This means a number of these materials remain in the experimental stage and their results are unreliable. The research aims to explore criteria through which the extent to which smart materials can be applied in the field of architecture can be determined by presenting a group of smart materials and displaying their behavior, characteristics, and obstacles to their integration within the smart system in the building.

Keywords: smart materials, architecture, material properties, smart material systems, nanotechnology.

1. المقدمة:

يتمتع المهندسون المعماريون والمصممون بموقع فريد يتيح لهم اختيار وتوجيه كيفية تغلغل الابتكارات الجديدة في حياتنا اليومية. وشهد مجال المواد الذكية تطوراً كبيرً في القرن العشرين، وأصبح هذا التطور أسرع في الآونة الاخيرة والذي مهد الطريق نحو تطور العمارة نفسها. والتغيرات الطارئة في متطلبات البناء على مر السنين وستستمر في التغيير في المستقبل أيضًا (Sanafi, 2023). إلا أن تصميم وإعادة استخدام مخزون البناء متأثرًا بالتقدم الاجتماعي والتكنولوجي. وهناك مقايضة فيما يتعلق بالتكلفة والأثر البيئي للتكنولوجيا المستخدمة لتحقيق كفاءة استخدام الطاقة. والمواد الذكية هي مجال يرتبط بتكنولوجيا المواد وتطبيقاتها في مجال العمارة. يهدف هذا المجال إلى تشجيع استخدام المواد التكنولوجية في تصميم المباني، بهدف تحسين وتعزيز الأداء العام للمباني والبنية التحتية الحضرية(Wakita et al., 2011). وتعتبر هذه المواد من الابتكارات الهامة في المجال المعماري، حيث يمكنها تحسين كفاءة الطاقة والاستدامة البيئية، وتعزيز سلامة المباني وراحة مستخدميها. وبفضل تصميمها الذكي يمكن أن تساهم في تحقيق تجربة معمارية فريدة ومتجددة. (Abdullah & Al-Alwan, 2019). ومع اختلاف الكثير من جوانب التكنولوجيا المتاحة للاستغلال، يصبح التصميم أمرًا حاسمًا لإنشاء بنية أفضل تستغل المواد الذكية ضمن مبنى ذكى متكامل يمكنها القيام بوظائف متعددة فضلا عن القدرة على الشعور بالتغيير الذي يؤدي إلى تغير خصائصها الفيزيائية، مثل الشكل أو الحجم أو الصلابة أو اللون أو الموصلية الكهربائية، استجابة للمؤثرات الخارجية، مثل درجة الحرارة والضغط، الضوء أو الرطوبة أو المجالات المغناطيسية أو الكهربائية. من خلال فهم أفضل لكيفية استخدام التقنيات الذكية وعمل أنظمة المواد، التي يمكنها دفع الهندسة المعمارية إلى الأمام و يمكن حقًا الوصول إلى عصر جديد من الابتكارات. ولتحقيق دمج المواد الذكية في العمارة(Wakita et al., 2011) ، يتطلب الأمر التعاون بين خبراء التصميم العماري والمهندسين والعلماء في مجالات متعددة مثل علوم المواد والهندسة الميكانيكية والإلكترونيات. حيث يتم مناقشة وتطوير خصائص وتكنولوجيا المواد الذكية بشكل مستمر لتلبية احتياجات وتحديات التي تواجه العمارة المتجددة. ومن الجوانب الرئيسية في تعلم دمج المواد الذكية في العمارة هي التعرف على المفاهيم الأساسية للمواد وتطبيقاتها وقدراتها المحتملة، بالإضافة إلى معرفة التصاميم والتقنيات الهندسية المستخدمة في تنفيذ هذه المواد في المشاريع العمارية المختلفة ومدى قابلية تطبيقا داخل نظام متكامل في المبنى (Abdullah & Al-Alwan, 2019).

2.1 المشكلة البحثية:

نظرا لحداثة المواد الذكية وخضعوها للتطوير المستمر لا توجد معايير للمواد الذكية يمكن من خلالها التحقق من تطبيقها ودمجها ضمن أنظمة المباني.

3.1 أهداف البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف معايير يمكن من خلالها معرفة مدى قابلية المواد الذكية للتطبيق والتنفيذ في الهندسة المعمارية او تظل في طور التجربة. حيث أن إطار عمل المواد الذكية في مجال العمارة يتعلق بالاستخدام المبتكر للمواد المتقدمة التي تحتوي على تقنيات ذكية. تهدف هذه المواد إلى تحسين الأداء والوظائف المختلفة في المباني والمنشآت العمرانية.

4.1 أهمية البحث:

مع التقدم في أبحاث المواد هناك اهتمام متزايد بمعرفة المواد الذكية وتطبيقاتها في تحسين كفاءة الطاقة وجودة البيئة الداخلية للمبنى. ومع وجود معايير لاختيار وتنفيذ المواد الذكية يمكن تطبيق أفكار جديدة من المواد الذكية ومواصلة تصميم أنظمة المواد المتقدمة بخصائص جديدة ومثيرة للاهتمام وغير مسبوقة.

5.1 منهجية البحث:

لتحقيق الهدف الرئيسي للبحث سيتم الاعتماد على المنهج الاستقرائي والاستنباطي حيث يبدء البحث بعرض تعريف المواد الذكية والتصنيفات الخاص بها وسرد المواد الذكية وتطبيقاتها في العمارة وصولا لاستنباط العوائق التي تقابلها المواد الذكية في التطبيق وطرح مجموعة من المعايير يمكن من خلالها تطبيق وتنفيذ المواد الذكية على نطاق واسع في الهندسة المعمارية.

6.1 إطار البحث:

غالبًا ما تُعتبر المواد الذكية امتدادًا منطقيًا للمسار في تطوير المواد نحو أداء أكثر انتقائية وتخصصية. ويعتمد اختيار المواد المستخدمة في الهندسة المعمارية دائمًا على معايير مختلفة. كالأداء والتكلفة والشكل الجمالي وسهولة التنفيذ وتوافرها محلياً أو إقليمياً

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

أيضاً. ولكن الاختيار النهائي غالبًا ما يتم على أساس المظهر والجمال. وهكذا يفكر المعماريون في كثير من الأحيان في المواد باعتبارها جزء من التصميم يمكن من خلاله اختيار المواد وقبولها كمستوى للأداء والتكوين الجمالي(Sanafi, 2023). وفى هذا الإطار من الممكن الوصول إلى طرق اختيار المواد الذكية. التي تعتمد على خصائص عالية الأداء لتلبية حاجة محددة ، مثل تغيير الشكل أو الحجم أو الصلابة أو اللون والموصلية الكهربائية، أو استجابة للمؤثرات الخارجية، مثل درجة الحرارة والضغط والضوء أو الرطوبة أو المجالات المغناطيسية أو الكهربائية (Qader et al., 2019).إلا أن أحد الصعوبات الرئيسية في دمج المواد الذكية في التصميم المعماري هو الاعتراف بأن عدد من المواد الذكية والأنظمة تخضع لتأثيرات بيئية واحدة. ، كاستخدام مادة ذكية للتحكم في انتقال الحرارة بالتوصيل عبر واجهات المبنى قد يؤثر سلبًا على انتقال ضوء النهار داخل المبنى. ونظرًا لأن معظم الأنظمة في المبنى تكون متكاملة بدرجة عالية، فمن الصعب تحقيق وتحسين الأداء دون التأثير على الأنظمة الأخرى. بالإضافة الى تكامل التكنولوجي لابد أن تكون المواد الذكية قابلة للتكامل مع النظام العام للمبنى والتحكم فيه. على سبيل المثال، يجب أن يتمكن النظام الذكي من التفاعل مع أنظمة التدفئة والتهوية والتكييف الموجودة في المبنى. ويتمتع بمتانة عالية وقدرة على تحمل الظروف البيئية المتغيرة وأن تكون قادرة على الحفاظ على أدائها على مدار الزمن دون الحاجة لتكاليف صيانة مكلفة(Konarzewska, 2017). كما يفضل أن تكون المواد مصنوعة من موارد مستدامة وقابلة لإعادة التدوير. وأن تتوافق المواد الذكية مع المعايير السلامة المعمول بها للمباني. وضمان أن استخدام هذه المواد لا يشكل خطرًا على المستخدمين أو البيئة المحيطة. وقد تكون المواد الذكية مكلفة في الشراء والتركيب بالمقارنة مع المواد التقليدية(Jerzy, 2020). لذلك يجب أن يتم احتساب هذه التكلفة الإضافية عند التخطيط لاستخدام المواد الذكية وتقييم فوائدها المحتملة للتصميم والأداء العام للمبنى. والتوافق مع التصاميم القائمة والأنظمة القائمة في المباني دون الحاجة إلى تعديلات كبيرة أو إعادة تصميم البنية التحتية. كما أن بعض هذه المواد تكون طور التجربة وغير موثوقة النتائج ولا تصلح إلا ان تكون أعمال فنية وليست ضمن نظام متكامل للمبنى. لذلك من المهم وضع معايير للمواد الذكية التي من خلالها يمكن الوصول الى مدى قابلية تلك المواد للتنفيذ والصعوبات التي تقابلها في التطبيق وللوصول إلى تلك الهدف تم طرح مجموعة من الاسئلة.

- ما هي المواد الذكية وتصنيفاتها؟
- ما هي خصائص وسلوك المواد الذكية؟
- ما هي المتطلبات المعمارية لتطبيق وتنفيذ المواد الذكية؟

2. تعريف المواد الذكية:

يعد تحديد المعنى الدقيق للمواد الذكية أمرًا صعبًا نظرًا لوجود عدة تعريفات للمواد الذكية غامضة وربما متناقضة، مما يجعل من الصعب تعريفها. ويتفق العالم العلمي بشكل عام على أن المواد الذكية هي مواد أو منتجات مشتقة لديها القدرة على تغيير خصائصها الكيميائية أو الفيزيائية بشكل عكسي استجابة لمحفزات خارجية، على الرغم من الخلافات في التفاصيل. إلا أن هذا المفهوم قابل للتطبيق عمليًا على جميع المواد المتاحة حاليًا وهي تمثل معضلة. كالصلب يمكنه تغيير خصائصه وشكله تحت تأثير قوة خارجية على سبيل المثال قد يتغير شكله عند تسخينه وكذلك المياه تتغير كثافتها، ولكن هذه المواد لا تعتبر مواد ذكية. وبالتالي، يشار إلى المواد غير التقليدية القابلة للبرمجة ذات الصفات الفيزيائية الاستثنائية على أنها مواد ذكية. ونتيجة لذلك، يجب أن نكون على دراية بتصنيف هذه المواد(Abdullah & Al-Alwan, 2019).

1.2. المواد الذكية

يوجد عدد كبير من المواد الذكية المختلفة وهي مواد تم تطويرها بتقنيات حديثة تسمح لها بتفاعل وتكيف مع ظروف البيئة المحيطة بها. تتميز المواد الذكية في مجال العمارة بالعديد من المميزات التي تجعلها خيارًا مثيرًا للاهتمام للمهندسين المعماريين والمصممين. ومنها التكيف مع البيئة حيث تستجيب هذه المواد للتغيرات في درجات الحرارة والضوء والرطوبة وغيرها من العوامل البيئية(Gomaa et al., 2016)، مما يسمح لها بتحقيق أقصى استفادة من الظروف الموجودة في المنطقة المحيطة. والمواد الذكية قادرة على تحسين كفاءة استخدام الطاقة في المباني، مثل مواد العوازل الحرارية الذكية التي تقلل من فقدان الحرارة أو البرودة في المباني. وللمواد الذكية إمكانية التحكم في خصائصها المادية، مثل مواد الزجاج الذكية التي يمكن تعديل درجة شفافيتها أو عازلتيها للضوء والحرارة باستخدام التحكم الكهرومغناطيسي. بالإضافة الى جمالية التصميم حيث تقدم المواد الذكية مجموعة متنوعة من الأشكال والتشطيبات التي يمكن تخصيصها لتناسب متطلبات التصميم المعماري وتوفر إمكانات إبداعية جديدة للمصممين. والجدول (1) هو سرد شامل لتلك المواد(Sobczyk et al., 2022). ألا أن بعض من تلك المواد يصعب استخدامها ضمن نظام متكامل للمبنى ويظل عدد منها يمكن أن يكون عمل فنى من المواد الذكية لا اكثر.

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

جدول (1) أنواع المواد الذكية.

المواد الذكية الباعثة للضوء	المواد الذكية المضيئة كهربائياً	الثنائيات الباعثة للضوء (LED)	الثنائيات العضوية الباعثة للضوء (OLED)	تلألؤ كهربائي للفيلم السميك	اللمعان الكهربائي للأغشية الرقيقة		
	مواد ذكية مضيئة	مواد الفلورسنت	المواد الفسفورية				
تغيير الالتصاق	المواد الذكية ذاتية اللصق						
مواد ذكية ذات خصائص بصرية متغيرة	والكهروضوئية	البوليمرات ذات الخصائص الكهروضوئية	بلورات سائلة متفرقة	أجهزة الجسيمات العالقة			
	ثير وكروميك وثيرموتروبيك	أصباغ حرارية	نظارات حرارية	نظارات حرارية	البلاستيك الحراري		
	المواد الذكية الفوتو كرومية	أصباغ فوتوكروميك	النظارات الفوتو كرومية	البلاستيك الفوتو كرومي			
السوائل الكهربائية/المغناطيسية		السوائل الكهربية	السوائل المغناطيسية				
البوليمرات النشطة كهربائيا		مركبات البوليمر المعدنية الأيونية (IPMCs)	البوليمرات الموصلة	المواد الهلامية المتعددة الإلكتروليت	اللدائن العازلة (DEs)		
مواد ذكية كهر ضغطية		السيراميك الكهر ضغطي	البوليمرات الكهر ضغطية	بلورات أحادية كهر ضغطية	أفلام كهر ضغطية		
المواد الذكية المقيدة مغناطيسيًا/المرنة		القبضات المغناطيسية	المواد المغناطيسية المرنة	نظارات معدنية			
المواد الذكية المقيدة		أوراق التقييد الكهربائي	السيراميك الكهربي	اللدائن المطعومة بالكهرباء			
مواد ذكية تغير شكلها		مواد التمدد الحراري	سبائك ذاكرة الشكل	بوليمرات ذاكرة الشكل	ذاكرة الشكل للسيراميك	ذاكرة الشكل الهجينة	الأنظمة البيولوجية ذات

2.2. تصنيف المواد الذكية:

هناك مجموعة واسعة من المواد التي تعتبر مواد ذكية .و يتم تصنيف المواد الذكية إلى مواد ذكية نشطة وسلبية .يوضح الشكل (1) أنواع المواد الذكية النشطة والسلبية . المواد الذكية السلبية هي تلك المواد التي يمكنها نقل الطاقة دون تغيير في خصائصها، على سبيل المثال، الألياف الضوئية. وتنقسم المواد الذكية النشطة إلى نوعين.

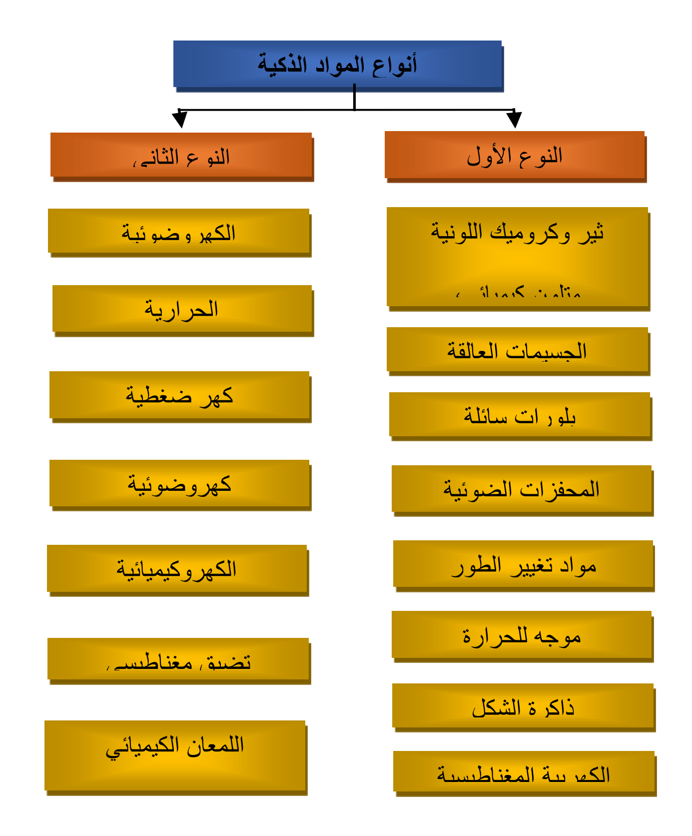
Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

1.النوع الأول

هذه هي التي لديها القدرة على تغيير خصائصها - الكيميائية، أو الميكانيكية، أو الكهربائية، أو المغناطيسية، أو الحرارية، بما في ذلك السبائك الكهر كرونية، والمغنطيسية، والموجهة للحرارة، وسبائك ذاكرة الشكل. يؤثر مدخلات الطاقة إلى مادة ما على الطاقة الداخلية للمادة عن طريق تغيير البنية المجهرية للمادة ويؤدي الإدخال إلى تغيير خاصية المادة.

2.النوع الثاني.

هذه لديها القدرة على تحويل الطاقة من شكل إلى آخر، بما في ذلك الخلايا الكهروضوئية، والكهر وحرارية، والكهر ضغطية، والضوئية، والتضييق الكهربائي. يؤدي إدخال الطاقة إلى المادة إلى تغيير حالة الطاقة في تركيبة المادة، ولكنها لا تغير المادة، فهي تظل كما هي، لكن الطاقة تخضع للتغيير(Vijayalaxmi, 2023).



الشكل (1) يوضح أنواع المواد الذكية النشطة والسلبية(Vijayalaxmi, 2023).

3. تطبيقات المواد الذكية في الهندسة المعمارية:

يمكن الجمع بين المواد والتكنولوجيا الذكية، مع قدرتها على إحداث تأثير مفيد استجابة لمحفز خارجي، لتوفير حلول متغيرة وديناميكية للمشاكل التي تتم مواجهتها أثناء التصميم لتحقيق كفاءة الطاقة. جدول (2) يوضح تصنيف تطبيقات المواد الذكية في العمارة. ويمكن تصنيف تطبيقات المواد الذكية في العمارة لتحسين كفاءة الطاقة على النحو التالي:

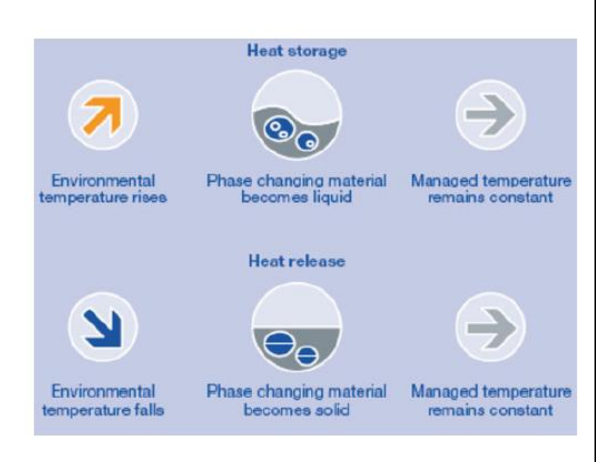
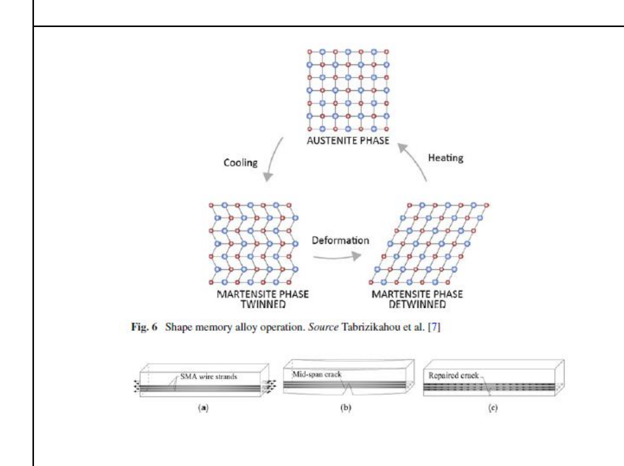
- استخدامها في واجهات المباني للتظليل الديناميكي والتحكم بالطاقة الشمسية (المواد الكر ومية)
- استخدام عناصر البناء لزيادة الكتلة الحرارية (PCMs)
- المركبات النانوية.
- الطاقة الكهروضوئية (PV).

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

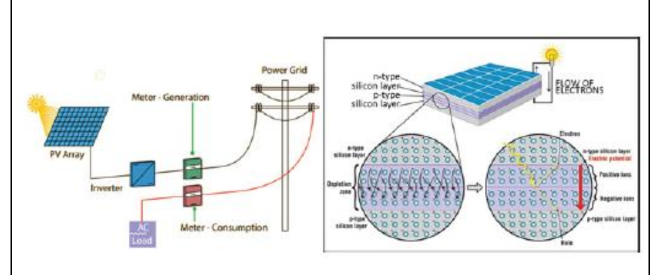
جدول (2) يوضح تصنيف تطبيقات المواد الذكية في العمارة.

المواد الذكية	التوصيف	التوضيح
المواد الكروم وجينية	المواد الكروم وجينية. هي مواد حرارية وكهروكيميائية وهي عائلة من المواد التي تغير لونها استجابة لبعض المحفزات الخارجية مثل درجة الحرارة والمجال الكهربائي(Ferrara, n.d.).	
جهاز الجسيمات المعلقة	هو موصلان شفافان يحيطان بطبقة من الجسيمات ثنائية القطب النشط (بطول 1 مم) المعلقة في البوليمر. وفي غياب الكهرباء، تكون هذه الجسيمات في حالة من الفوضى وتمتص الضوء. وعند التشغيل، تصطف الجزيئات وتعزز عملية نقل الضوء. وتعتبر مستويات النقل 6-75% و15-60% نموذجية، مع سرعات تحويل تتراوح بين 100-200 مللي ثانية. وللتشغيل يتطلب الجهاز 100 فولت وتيار متواضع(Casini, 2016).	Off state No voltage On state Voltage
بلورات سائلة مشتتة من البوليمر	يتم إنشاء فيلم (PDLC) بين طبقتين من البوليستر أو الزجاج الشفاف المطلي بمادة موصلة والذي تعمل كقطب كهربائي ويتم توجيه جزيئات الكريستال السائل نحو المجال عندما يتم توفير الكهرباء. يؤدي هذا إلى مطابقة الشكل بين القطرات وتكون مصطفة بشكل يؤدي إلى انتقال الضوء. وعند إيقاف تشغيله، يبدو الجهاز بلون أبيض شفاف. وفي وجود مجال كهربائي، تصطف البلورات السائلة مع المجال، ويصبح الفيلم شفافًا تمامًا(Casini, 2016).	Off state No voltage On state Voltage
الزجاج الكهربائي	الزجاج الكهربائي (المعروف أيضًا باسم الزجاج الذكي أو الزجاج الديناميكي) هو نوع من الزجاج الملون الإلكتروني الذي يستخدم على نطاق واسع في النوافذ والواجهات والقواطع الداخلية. حيث تنتقل أيونات الليثيوم (الموضحة كدوائر باللون الازرق) من القطب الداخلي إلى القطب الخارجي عندما يتم توفير جهد كهربائي إلى نقاط الاتصال الخارجية. نظرًا لأن النافذة تعكس الآن ضوءًا أقل وترسل كمية أقل من الضوء، فإنها تبدو معتمة. ويمكن التحكم فيه بواسطة أجهزة استشعار درجة الحرارة أو يدويًا من قبل المستخدمين لتحسين الظروف البيئية الداخلية والذى بتحسينها يوفر استخدام الطاقة وهى توفر للمهندسين المعماريين حلولاً مثالية يمكن دمجها في التصميم ومن خلالها يمكن التحكم في ضوء النهار(Casini, 2016).	Separator Outside face Lithium ions Electrodes Conductors www.explainthatstuff.com Separator Outside face Lithium ions move Electrodes Conductors

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

مواد تغيير الطور (PCM)	PCM هي مواد تستخدم ظاهرة انتقال الطور لجمع أو إطلاق الحرارة الكامنة دون رفع درجة حرارتها الداخلية. وعندما تكون درجة الحرارة أعلى من درجة الحرارة المحددة خلال النهار، تتعرض المادة لتغير طور من الحالة الصلبة إلى السائلة، مما يؤدي إلى إزالة الحرارة من البيئة المحيطة. وعندما تنخفض درجة الحرارة إلى أقل من درجة الحرارة المحددة ليلاً، تقوم المادة بعكس الطور لاستعادة الحرارة المجمعة إلى البيئة. يمكنهم استخدام الحمل الحراري الطبيعي لامتصاص الطاقة الحرارية أو الطاقة الشمسية. يمكن تحسين مستويات راحة الإنسان من خلال زيادة سعة التخزين الحراري للمبنى (Mohamed, 2017). وهذا يقلل من تكرار التغيرات في درجة حرارة الهواء الداخلي، مما يؤدي إلى درجة الحرارة المثالية لفترات أطول. تُستخدم مواد تغيير الطور على نطاق واسع في أنظمة الطاقة الشمسية السلبية ذات الكسب المباشر أو الفضاء الشمسي. تم استخدام أجهزة PCM بشكل تقليدي للحفاظ على استقرار درجات الحرارة الداخلية للمبنى. لذلك، كانت أسطح المباني الداخلية مثل الجدران والأسقف والأرضيات هي أفضل المواقع لـ PCM. يتم استخدام PCM كأحد مكونات الغلاف الحراري للمبنى. والفوائد الناتجة عن استخدامها في غلاف المبنى هي: تحقيق هيكل ذو سماكة قليلة وتقليل تقلبات درجة الحرارة الداخلية وتقليل استخدام الطاقة داخل المباني وتحسين الراحة الحرارية(Vijayalaxmi, 2023).	
سبائك ذاكرة الشكل	يمكن لهذه المواد أن تغير شكلها استجابة لتغيرات درجة الحرارة ويمكن أن تعود إلى شكلها السابق كرد فعل للضغط الخارجي. وتسمى السبائك ذات ذاكرة الشكل أيضًا بالمواد الذكية. عند تسخينها، فإن العنصر الذي يكون في حالة درجة الحرارة المنخفضة والذي تم تغييره من الجزء البلاستيكي مع إزالة جميع الضغوط الخارجية سوف يستعيد شكله الأصلي (الذاكرة). تأتي السبائك ذات ذاكرة الشكل في مجموعة متنوعة من الأشكال، ولكن سبائك النيكل والتيتانيوم، والتي تحتوي على 45-50٪ تيتانيوم، هي الأكثر كفاءة وشهرة(Sobczyk et al., 2022).	 Fig. 6 Shape memory alloy operation. *Source* Tabrizikahou et al. [7]

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

مواد العزل الحراري المعتمدة على تقنية النانو	هي مادة رغوية خفيفة الوزن وتضمن أعلى معايير الحماية من الشمس وتعتبر واحدة من أكثر طرق إعاقة نقل الحرارة في مواد العزل الحراري التي تم تطويرها باستخدام تقنية النانو. ونتيجة لذلك، فهي قادرة على تقليل معامل نقل الحرارة للهياكل. (Airgel)عبارة عن مادة اصطناعية خفيفة الوزن ومسامية تم إنشاؤها عن طريق استبدال السائل بالغاز في مادة هلامية. ونتيجة لذلك، فإن المادة الصلبة لديها كثافة منخفضة جدًا وموصلة للحرارة. وتعتبر ألواح العزل الهوائي وألواح العزل الفراغي من أنواع العزل الحراري. يمكنهم تقليل الانتقال الحراري بشكل كبير. ونتيجة لذلك، فهي أكثر مقاومة لنقل الحرارة من المواد التقليدية. وقد يصبح العزل الهوائي بديلاً عمليًا لمواد عزل المباني التقليدية الحالية إذا أمكن إنتاجه بطريقة أكثر اقتصادية ومجدية بيئيًا، حيث يجمع بين مزايا معظم مواد عزل المباني التقليدية. ويمكن رؤية الإمكانات الهائلة التي يتمتع بها (Airgel) في شفافيته. حيث إنه قد يؤدي يومًا ما إلى توفير كبير في الطاقة في النوافذ. فهي قادرة على تقليل معامل نقل الحرارة للهياكل(Ganobjak et al., 2023).	
الخلايا الكهروضوئية	تستخدم الخلايا الكهروضوئية الإشعاع الشمسي بشكل فعال عن طريق تحويله إلى طاقة كهربائية؛ يمكن استخدامها أيضًا كنوع من التظليل السلبي للشمس. وتُستخدم أشباه الموصلات مثل السيليكون، وهي موصلات وعوازل لإنتاج التأثير الكهروضوئي(Tarfiei, 2015). ومن خلال إضافة "المنشطات" وهي شوائب صغيرة، يمكن التحكم في تدفق الإلكترونات عبر المادة بين طبقتين من السيليكون من النوع(n) والطبقة الثانية من السيليكون من النوع(p)التي تشكل خلية شمسية. وعندما يتم توصيل الطبقات بواسطة سلك معدني وتعرضها للأشعة الشمسية، فإن الإلكترونات سوف تمر عبر منطقة النضوب من طبقة النوع (n) إلى طبقة النوع (p) ثم تعود عبر السلك الخارجي لطبقة النوع (n). يؤدي هذا إلى إنشاء تدفق للتيار الكهربائي. علما بأن العوامل التي تؤثر على أداء النظام الكهروضوئي هي: الموقع والميل والتوجيه والتظليل الزائد - التضاريس، الغيوم، العوائق الشمسية، التظليل الذاتي إلخ (Moussa, 2020).	

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

مادة كهر ضغطية	من خلال تطبيق الإجهاد أو الانفعال على مادة كهر ضغطية، يتم تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية والعكس صحيح. وتقوم المحركات الكهر ضغطية بتحويل الكهرباء إلى حركات ميكانيكية (Qader et al., 2019).تستخدم لضبط المرايا والعدسات ومكونات أخرى. تعتبر المواد الكهر ضغطية أكثر مراعاة للبيئة لأنها تبدد الطاقة من التغيرات والاضطرابات الهيكلية، مما يؤدي إلى انخفاض استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. يُصنع البلاط الكهر ضغطي من البلورات والسيراميك، حيث تتراكم الشحنة الكهربائية عند تطبيق ضغط ميكانيكي، مثل الضغط بالقدم عليها. ويمكن أن تنتج 260 بلاطة من بلاطات "الأرضيات ذات الطاقة المستدامة" 1820 كيلووات يوميًا. وسيوفر اعتماد البلاط الكهر ضغطي 83% من إجمالي الاحتياجات اليومية للكهرباء للمبنى(Dapino, 2004).	

4. خصائص وسلوك المواد الذكية:

يمكن مناقشة المواد الذكية كبديل للمواد التقليدية في العديد من المكونات والوظائف بسبب مميزاتها وخصائصها التي تميزها عن معظم المواد التقليدية المستخدمة في الهندسة المعمارية(Dobrescu, 2021). وتشمل هذه الخصائص والميزات. الانتقائية والفورية، والتفاعل الذاتي والمباشر التي تكون أكثر دقة لخصائص هذه المواد. وللتركيز على القدرات والسلوكيات المختلفة وخصائص تفاعلها وكيفية استجابتها للأحداث والظروف البيئية. هناك أربع قدرات أساسية لسلوك المواد الذكية المستخدمة في الهندسة المعمارية (Sadeghi et al., 2011). القدرة على تغيير الخاصية، القدرة على تبادل الطاقة وحجم وإمكانية العودة الى الشكل الأساسي. ويمكن استغلال هذه الميزات إما لتحسين خصائص المادة لمطابقتها لشروط الإدخال بشكل أفضل أو لتحسين سلوكيات معينة للحفاظ على الحالة المستقرة للظروف البيئية. والمواد ذات القدرة على تبادل الطاقة لها العديد من التطبيقات في الهندسة المعمارية يمكن أيضًا أن تتلقى طاقة مدخلة(Cahn, 2003)، ووفقًا لقانون الديناميكا الحرارية، تتغير إلى شكل آخر من أشكال الطاقة تستخدم حسب الظروف والمواقف. ويمكن أيضًا إظهار المواد التي لها الخاصية الانعكاس في نفس الوقت. ويمكن للمواد التي تتمتع بهذه القدرة العودة إلى نفس الحالة الأولية(Saidam et al., 2017). إلا أن المواد الذكية أكثر تكلفة من المواد التقليدية. نتيجة للأبحاث والتطوير المشترك والاستثمار في التكنولوجيا الحديثة جميعها تسهم في زيادة تكلفة المواد الذكية. ومع ذلك، يمكن أن يتم توفير التكاليف على المدى الطويل بسبب فوائدها في توفير الطاقة والاستدامة. بعض المواد الذكية قد تكون أكثر عرضة للأعطال مقارنة بالمواد التقليدية. ويمكن أن تتأثر خواصها بالاستخدام المتكرر والتأثيرات البيئية والاهتزازات، أو تعرضها للرطوبة. وهذا يمكن أن يتطلب صيانة مستمرة وتكاليف إضافية. ويمكن أن يكون استخدام المواد الذكية في المشاريع الهندسية والمعمارية تحديًا، حيث يجب أن يتم استيعاب وتوافق هذه المواد مع تصميم المبنى والأنظمة الموجودة. ويلزم تعلم وتدريب الفرق الهندسية والمقاولين على تطبيق هذه المواد بطريقة صحيحة. ومن الجدير بالذكر أنه مع تقدم التكنولوجيا وزيادة البحوث في هذا المجال، من المتوقع أن يتحسن أداء المواد الذكية في المستقبل وتتجاوز بعض العيوب الحالية(Ibrahim, 2019).

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

جدول (3) خصائص وسلوك المواد والمتطلبات المعمارية.

المتطلبات المعمارية	المادة الذكية	الخصائص	سلوك	التطبيق
السيطرة على الإشعاع الشمسي من خلال اغلفة المبنى.	ثير وكروميك، فوتو كروميك، ترو كرومي	من خلال إدخال الطاقة الحرارية والأشعة فوق البنفسجية والتغيير والتركيز الكيميائي والتوتر الكهربائي.	تغيير اللون.	يمكن تطبيقها في الواجهات الخارجية والقواطع الداخلية الزجاجية.
	الجسيمات العالقة/البلورات السائلة	من خلال إدخال التوتر الكهربائي.	تغيير اللون.	
السيطرة على الحرارة الداخلية. تقليل تقلبات درجة الحرارة الداخلية -تقليل استخدام الطاقة داخل المباني تحسين الراحة الحرارية	المواد المتغيرة الطور	تمتص أو تطلق الحرارة الكامنة من خلال تغيير حالتها الفيزيائية.	العزل الحراري	استخدامها في غلاف المبنى وتحقيق غلاف بناء ذات سمك قليل
التحكم في نسبة الإضاءة الساقطة على الغلاف الخارجي والتحكم في درجة الحرارة	سبائك ذاكرة الشكل	تحتوي السبائك ذات ذاكرة الشكل على ذاكرة لاستعادة شكلها الأصلي ويمكن أن تغير شكلها أو تعود إلى شكلها الأصلي بناءً على المحفزات الخارجية.	سلالة ميكانيكية	الواجهات الخارجية.
أنظمة إمداد الطاقة الثانوية وتحسين أنظمة الإضاءة والتحكم في درجة الحرارة	الخلايا الكهروضوئية	استخدام الطاقة الشمسية توليد تيار كهربائي.	الاستقطاب الكهربائي	الاسطح المعرضة لأشعة الشمسي
تحسين أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء. و السيطرة على توليد الحرارة الداخلية	كهر وحرارية	مواد لها القدرة على توليد الكهرباء من خلال اختلاف درجة الحرارة.	توليد الكهرباء	زيادة قدرة الإضاءة الصناعية
السيطرة على الإشعاع الشمسي من خلال اغلفة المبنى. تغيير في الاشكال الخارجية لأغلفة المبنى.	الكهر ضغطية	الأجهزة الكهر ضغطية ثنائية الاتجاه بطبيعتها. توليد كهرباء من الحركة أو يتم عكس الآلية؛.	إنشاء تغيير في الشكل باستخدام تيار كهربائي. سلالة ميكانيكية	الواجهات الخارجية
توليد طاقة كهربائية	الكهروكيميائية	يتم تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية والعكس.	توليد طاقة كهربائية	الإضاءة الصناعية
الإضاءة الخارجية والاعمال الفنية	التوهج الكهربائي، والتألق الضوئي، والتألق الكيميائي، والتألق الحراري	المواد التي تحول الكهرباء والطاقة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية والحرارة والطاقة من طيف الأشعة فوق البنفسجية.	انتاج طاقة إشعاعية (الطيف المرئي)	الإضاءة

ويوضح الجدول (3) خصائص وسلوك المواد والمتطلبات المعمارية. ومدى تنوع المواد التي يمكن استخدامها في مجال العمارة والسلوك الذى يمكن للمعماريين تطبيقه في شتى الجوانب المعمارية والتشكيلية للمبنى(Sadeghi et al., 2011). حيث ان المعماريون لا يصممون فقط الفراغات الداخلية كما هو معتقد، بل يصممون الواجهات الخارجية ويعتبر الشكل الخارجي من أهم العناصر المعمارية لديهم ومعظم المحاولات الحالية للتنفيذ المواد الذكية في التصميم المعماري تحافظ على مفردات السطح ثنائي الأبعاد(Dorrah & Saleh, 2017). و هناك العديد من المقترحات لاستبدال الواجهات الزجاجية التقليدية بزجاج الكهرو كرومي الذي يغلف واجهة المبنى بالكامل وهذا العنصر المهم يدفع المعمارين في التفكير في حال تم اتخاذ قرار استخدام المواد الذكية هو الشكل ومدى الصعوبات التي تقابل تطبيق وتنفيذ تلك المواد ومنها التكلفة بسبب التكنولوجيا العالية الغير متوفرة في كثير من البلدان وبالتالي الصيانة الصعبة نتيجة لتك التكنولوجيا و الاستدامة التي تواجه المواد الذكية نتيجة للأعطال نظرا لحداثة بعض المواد و مدى توافق تلك المواد مع الأنظمة المختلفة للمبنى .لذلك يتطلب الامر وجود فريق مدرب على صيانة وتغيير تلك المواد علما بان يوجد عدد من هذه المواد في طور التجربة وغير موثوقة النتائج ولا تصلح الا لأعمال الفنية فقط لذلك هي عقبات تقابل تطبيق المواد الذكية(Sadeghi et al., 2011) .

5. عقبات تطبيق العمارة الذكية في الهندسة المعمارية:

على الرغم من العديد من المزايا التي تتمتع بها المواد الذكية، إلا أنها تواجه بعض العقبات في التنفيذ. فيما يلي بعض المعوقات الشائعة التي قد تواجه تطبيق المواد الذكية في العمارة:

- تكلفة المواد: تعتبر المواد الذكية في العمارة عادة أغلى من المواد التقليدية. قد يكون السعر المرتفع لتلك المواد عائقًا للاعتماد عليها بشكل شامل في المشاريع الكبيرة.
- قدرات التشغيل: قد تتطلب المواد الذكية العديد من الأجهزة والأنظمة لتعمل بكفاءة. قد لا يكون التوفر والصيانة لهذه الأجهزة سهلاً أو متوفرة في كل مكان.
- التوافق والتكامل: قد يكون من الصعب تكامل المواد الذكية مع التصاميم الحالية والبنية التحتية الموجودة في العقارات المبنية بالفعل، وهذا يتطلب إجراء تعديلات وتحديثات دقيقة ومكلفة.
- القوانين واللوائح: قد تكون هناك قوانين ولوائح قائمة تحد من استخدام المواد الذكية، خاصة عندما يتعلق الأمر بمواضيع الخصوصية والأمان.
- التعلم والتدريب: تتطلب المواد الذكية مهارات ومعرفة خاصة لتصميمها وتركيبها وصيانتها. قد يحتاج العاملون في القطاع إلى تدريب مكثف للاستفادة الكاملة من تلك التقنية.
- الثقة والمخاوف: قد يواجه المستخدمون المحتملون مشاكل في الثقة والقبول للمواد الذكية في المباني والمنشآت. بعض الأشخاص قد يشعرون بالقلق بشأن خصوصيتهم أو مخاطر الاختراق السيبراني؛ وبالتالي، يحتاج إلى التوعية والتثقيف لزيادة قبول هذه التقنيات الجديدة.
- صيانة وتشغيل: تُشكل المواد الذكية تحديًا عندما يتعلق الأمر بصيانتها وإصلاحها. قد يتطلب استخدام التقنيات الجديدة مهارات خاصة في الصيانة والتشغيل التي قد لا تتوفر عادةً.
- على الرغم من هذه المعوقات، فإن المواد الذكية في العمارة تعتبر تحولًا هامًا في صناعة البناء. توفر إمكانيات إضافية للتحكم في المباني وتعزيز الكفاءة والاستدامة. ومع تطور التكنولوجيا وتوسع استخدام المواد الذكية، يمكن حل العديد من هذه المشاكل بوضع معايير يمكن من خلالها المساعدة في اتخاذ قرار تطبيق المواد الذكية في المبنى.

6. معايير تطبيق المواد الذكية في الهندسة المعمارية:

لضمان تطبيق ناجح لهذه المواد في العمارة، تم طرح عدة معايير يجب أخذها في الاعتبار عند اختيار وتنفيذ المواد الذكية لضمان أنها تعمل بشكل فعال وتحقق أهداف التصميم والاستدامة.

- الكفاءة الإنشائية: يجب أن تكون المواد الذكية قادرة على تحمل الأحمال الهيكلية والإجهادات الميكانيكية التي تتعرض لها المباني بشكل طبيعي، مع الحفاظ على مستوى عالٍ من الأمان.
- المتانة والاستدامة: يجب أن تتمتع المواد الذكية بمتانة عالية وقدرة على تحمل الظروف البيئية المتغيرة. وينبغي أن تكون قادرة على الحفاظ على أدائها على مدار الزمن دون الحاجة لتكاليف صيانة مكلفة. كما يفضل أن تكون المواد مصنوعة من موارد مستدامة وقابلة لإعادة التدوير
- التوافق مع التكنولوجيا المستخدمة: يجب أن تكون المواد الذكية قابلة للتكامل مع الأنظمة التكنولوجية المستخدمة في المباني، مثل أنظمة الإضاءة الذكية ونظم التحكم في درجة الحرارة والتهوية. يتعين أن تتوافق هذه المواد مع بنية الشبكة التكنولوجية المحددة

لتحقيق أفضل أداء ممكن. وأن تكون المواد الذكية قابلة للتوافق مع التصاميم القائمة والأنظمة القائمة في المباني دون الحاجة إلى تعديلات كبيرة أو إعادة هندسة البنية التحتية.

- الاستدامة البيئية: ينبغي أن تكون المواد الذكية قادرة على تحقيق مستوى عالٍ من الاستدامة البيئية، من خلال توفير فوائد بيئية كبيرة مثل توفير الطاقة، وإدارة فعالة للموارد المستخدمة، وتقليل النفايات الناجمة عن عمليات التصنيع والتشغيل.
- السلامة: يجب أن تتوافق المواد الذكية مع المعايير السلامة المعمول بها للمباني. وينبغي ضمان أن استخدام هذه المواد لا يشكل خطرًا على السكان أو البيئة المحيطة.
- الجمالية والتصميم: يجب أن تتوفر للمواد الذكية الخصائص التصميمية والجمالية التي تلائم الأغراض المعمارية والجمالية للمبنى. يجب أن تكون هذه المواد متوافقة مع السياق المعماري العام وتعزز جودة وجمالية التصميم.
- التكلفة والأداء الاقتصادي: قد تكون المواد الذكية مكلفة في الشراء والتركيب بالمقارنة مع المواد التقليدية. ويجب أن يتم احتساب هذه التكلفة الإضافية عند التخطيط لاستخدام المواد الذكية وتقييم فوائدها المحتملة للتصميم والأداء العام للمبنى.
- مراعاة هذه المعايير لتطبيق المواد الذكية في العمارة يساهم في تعزيز أداء المباني وتحسين تجربة المستخدمين، بالإضافة إلى الاستدامة البيئية والاقتصادية للمشروعات المعمارية.

7. الهدف من وضع معايير لتطبيق المواد الذكية:

- زيادة الأداء القائم على البيانات: تهدف المعايير إلى تعزيز استخدام المواد الذكية التي تتيح جمع البيانات وتحليلها واستخدامها لتحسين أداء المباني. وهذا يشمل المراقبة الذكية للطاقة والتكييف والإضاءة وغيرها من الأنظمة لتحقيق أقصى استفادة من المواد التكنولوجية.
- الاستدامة البيئية: تهدف المعايير إلى استخدام المواد الذكية التي تعزز الاستدامة البيئية، مثل المواد التي تعمل على تقليل استهلاك الطاقة والمياه وتحقيق الكفاءة البيئية في عملية البناء والاستخدام.
- تعزيز السلامة والأمان: تهدف المعايير إلى استخدام المواد الذكية التي تعزز مستوى السلامة والأمان في المباني، مثل استخدام المواد ذات مقاومة عالية للحريق والتحكم الذكي في نظام الأمان والمراقبة.
- توفير الراحة والرفاهية: تهدف المعايير إلى استخدام المواد الذكية التي تسهم في تحسين راحة وجودة حياة المستخدمين، مثل استخدام الزجاج الذكي للتحكم في درجة الإضاءة والتهوية الطبيعية.
- التكلفة والفعالية: تهدف المعايير إلى تحقيق توازن مثالي بين أداء المواد الذكية والتكلفة المالية لتطبيقها في المشاريع العمرانية.

من خلال تطبيق هذه المعايير، يتم تحقيق استخدام فعال للمواد الذكية في العمارة، وتحسين أداء وجودة المباني والبيئة المبنية بشكل عام.

8. الخلاصة:

تطبيق المواد الذكية في مجال الهندسة المعمارية يعتمد بشكل أساسي على قدرة تلك المواد لتغيير أشكالها وخصائصها، تحت تأثير المحفزات الخارجية مثل الرطوبة ودرجة الحرارة والإشعاع الشمسي، والضوء، وحركة الهواء، وغيرها. البحوث الأساسية حول المواد والتقنيات الذكية يمكن تنفيذ العديد من التطبيقات الناجحة في السياق المعماري والهندسي بالفعل. ولتحقيق دمج المواد الذكية في العمارة، يتطلب الأمر التعاون بين خبراء التصميم العماري والمهندسين والعلماء في مجالات متعددة لتطوير خصائص وتكنولوجيا المواد الذكية بشكل مستمر لتلبية احتياجات وتحديات التي تواجه العمارة المتجددة. ومن الجوانب الرئيسية في دمج المواد الذكية في العمارة هي التعرف على المفاهيم الأساسية للمواد وتطبيقاتها وقدراتها المحتملة، بالإضافة إلى معرفة التصاميم والتقنيات الهندسية المستخدمة في تنفيذ هذه المواد في المشاريع المعمارية المختلفة ومدى قابلية تطبيقها داخل نظام متكامل فى المبنى إلا أن الدراية بخصائص وسلوك المواد الذكية جزءا لا يتجزأ من التحقيقات حول إمكانية تطبيق المواد الذكية، وكذلك أساليب التصميم الجديدة في الهندسة المعمارية. والتي يمكن أن تقابل بعض المعوقات في التطبيق والتنفيذ. منها التكنولوجيا المتقدمة للمواد الذكية غير المتوفرة في كثير من البلدان والاعطال التي تحتاج الى صيانتها من فريق متخصص على دراية بتلك المواد بالإضافة الى المتانة وصعوبة التثبيت والتوافق مع باقي الأنظمة المقامة بالفعل دون إعادة تصميم المبنى. إلا أن وجود معايير يزيد من معرفة مدى قابلية المواد الذكية للتطبيق والتنفيذ وتقليل العقبات وفتح أفاق حول البحث في المواد الذكي التي يمكن دمجها ضمن أنظمة المباني. وتكون أكثر استجابة وتكيفًا مع الوظائف والاستخدامات الجديدة، وأكثر مرونة في مواجهة تقلبات وتغيرات الظروف البيئية ولا تقف فقط عند حدود الاعمال الفنية.

9. المراجع:

Abdullah, Y. S., & Al-Alwan, H. A. S. (2019). Smart material systems and adaptiveness in architecture. *Ain Shams Engineering Journal*, *10*(3), 623–638. https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.02.002

Cahn, R. (2003). Encyclopledia of Smart Materials. In *Intermetallics* (Vol. 11, Issue 1). https://doi.org/10.1016/s0966-9795(02)00122-x

Casini, M. (2016). Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance. *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*, *July*, 1–363. https://doi.org/10.1016/C2015-0-00182-4

Dapino, M. J. (2004). On magnetostrictive materials and their use in adaptive structures. *Structural Engineering and Mechanics*, *17*(3–4), 303–329. https://doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.303

Dobrescu, L. A. (2021). From Traditional to Smart Building Materials in Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1203*(3), 032113. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/3/032113

Dorrah, M. M., & Saleh, A. M. M. M. (2017). Smart materials as new technological tool in architecture facades. *Journal of Engineering and Applied Science*, *64*(6), 409–427.

Ferrara, M. (n.d.). *SPRINGER BRIEFS IN APPLIED SCIENCES AND Materials that Change Color Smart Materials , Intelligent Design*.

Ganobjak, M., Brunner, S., Hofmann, J., Klar, V., Ledermann, M., Herzog, V., Kämpfen, B., Kilian, R., Wehdorn, M., & Wernery, J. (2023). *Current Trends in Aerogel Use in Heritage Buildings : Case Studies from the Aerogel Architecture Award 2021*.

Gomaa, E. G., Badran, E. E., Mahmoud, M. A., & Saleh, A. M. (2016). The Use of Smart Materials in Raising the Efficiency of the Performance of Buildings. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, *5*(10), 1--18.

Ibrahim, V. (2019). Smart Materials and Iot Adaptability in Architecture As Transformative Elements in the Concept of Creative Children Spaces. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, *14*(53), 1499–1515. https://doi.org/10.21608/auej.2019.64233

Jerzy, S. (2020). Application of Smart Materials in Civil Engineering and Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *958*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/958/1/012006

Konarzewska, B. (2017). Smart Materials in Architecture: Useful Tools with Practical Applications or Fascinating Inventions for Experimental Design? *IOP Conference Series: Materials Science and*

Art and Architecture Journal
Volume 4, Issue 1, p 208 - 221
Print ISSN 2805-2838
Online ISSN 2805-2846

Engineering, *245*(5). https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052098

Mohamed, A. S. Y. (2017). Smart Materials Innovative Technologies in architecture; Towards Innovative design paradigm. *Energy Procedia*, *115*, 139–154. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.014

Moussa, R. R. (2020). Installing piezoelectric tiles in children outdoor playing areas to create clean & healthy environment; case study of El-Shams sporting club, Cairo_Egypt. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, *16*, 471–479. https://doi.org/10.37394/232015.2020.16.48

Qader, I. N., Kök, M., Dagdelen, F., & Aydogdu, Y. (2019). A Review of Smart Materials: Researches and Applications. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, *6*(3), 755–788. https://doi.org/10.31202/ecjse.562177

Sadeghi, M. J., Masudifar, P., & Faizi, F. (2011). The Function of Smart Material ' s behavior in architecture. *2011 International Conference on Intelligent Building and Management*, *5*(January), 317–322.

Saidam, M. W., Al-Obaidi, K. M., Hussein, H., & Ismail, M. A. (2017). The application of smart materials in building facades. *Ecology, Environment and Conservation*, *23*((Nov. Suppl. Issue)), S8–S11. https://www.researchgate.net/publication/316922070_The_application_of_smart_materials_in_building_facades

Sanafi, N. Al. (2023). *The Influence of Materials Technology in Developing the Concepts of Designing*. *3*(1), 7–26.

Sobczyk, M., Wiesenhütter, S., Noennig, J. R., & Wallmersperger, T. (2022). Smart materials in architecture for actuator and sensor applications: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *33*(3), 379–399. https://doi.org/10.1177/1045389X211027954

Tarfiei, M. (2015). Smart Building Materials in Sustainable architecture: A Case Study in Electrochromic Glass. *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, *3*(3), 408–416. www.european-science.com

Vijayalaxmi, J. (2023). Building Thermal Performance and Sustainability Issues. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 316). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9139-4_1

Wakita, A., Nakano, A., & Ueno, M. (2011). SMAAD Surface. *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research*, 355–364.